

Tema 4. Aleaciones Hierro-Carbono. Aceros y Fundiciones.

4.1. Diagrama Fe-C. 4.2. Aceros y fundiciones. 4.3. Aceros inoxidables. 4.4. Curvas TTT de aceros.

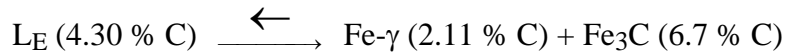
El sistema de aleaciones binario más importante es el hierro-carbono. Los aceros y fundiciones son aleaciones hierro-carbono. La clasificación de las aleaciones férreas según el contenido en carbono comprende tres grandes grupos: **hierro** cuando contiene menos del 0.008 % en peso de C, **acero** cuando la aleación Fe-C tiene un contenido en C mayor del 0.008 y menor del 2.11 % en peso (aunque generalmente contienen menos del 1 %), y **fundición** cuando la aleación Fe-C tiene un contenido en C superior al 2.1 % (aunque generalmente contienen entre el 3.5 y el 4 % de C).

4.1. Diagrama Fe-C. Fases en el sistema Fe-Fe₃C. En la figura 4.1 se representa el diagrama de fases del sistema binario Fe- Fe₃C para contenidos altos de hierro. El hierro sufre cambios estructurales con la temperatura antes de fundir. A temperatura ambiente la forma estable es la **ferrita** o Fe- α (estructura CCI). A 912 °C la ferrita sufre una transformación polimórfica a **austenita** o Fe- γ (CCC). La austenita se transforma a otra fase CCI a 1394 °C que se conoce como ferrita- δ , la cual funde a 1538 °C. Todos estos cambios se pueden observar en el eje vertical del diagrama de fases para el hierro puro. El otro eje de la figura 4.1 sólo llega al 6.70 % en peso de C, concentración que coincide con el 100 % molar del compuesto intermedio Fe₃C conocido como carburo de hierro o **cementita**. La parte entre el 6.70 % de C y el 100 % de C (grafito puro) no es importante desde el punto de vista tecnológico y no se va a estudiar.

El carbono en un soluto intersticial en el hierro y forma disoluciones sólidas con la ferrita (α y δ) y con la austenita (γ). La ferrita tiene una estructura CCI y en los intersticios se puede situar muy poco carbono, el máximo es un 0.022 % a 727 °C. Aunque en proporción muy baja, el carbono afecta mucho a las propiedades mecánicas de la ferrita. Esta fase es relativamente blanda, ferromagnética por debajo de 768 °C, y de densidad 7.88 g/cc. La austenita (Fe- γ) de estructura CCC tiene una solubilidad máxima de carbono del 2.11 % a 1148 °C. Solubilidad aproximadamente 100 veces superior a la de la ferrita. Las transformaciones de fase de la austenita son muy importante en los tratamientos térmicos de los aceros como se verá más adelante. La ferrita- δ solo se diferencia de la α en el tramo de temperatura donde existe. Al ser sólo estable a altas temperaturas no tiene interés técnico.

La cementita desde el punto de vista mecánico es dura y frágil, y su presencia aumenta la resistencia de muchos aceros. Desde un punto de vista estricto, la cementita es meta estable y si se calienta entre 650 y 700 °C descompone para dar Fe- α y grafito en el periodo de años, que permanece al enfriar. Por tanto, los diagramas no son realmente de equilibrio, pero al ser la velocidad de descomposición de la cementita tan extremadamente lenta estos diagramas son los útiles.

En la figura 4.1 se puede observar regiones bifásicas y un eutéctico ($C_E = 4.30$ % en peso de C, y $T_E = 1148$ °C). La reacción eutéctica es:



En la que un líquido de composición eutéctica solidifica para dar dos fases sólidas de austenita y cementita. El posterior enfriamiento de estas fases produce transformaciones de fases adicionales. En el diagrama de fases se puede observar otro punto invariante a la temperatura de 727 °C para una composición del 0.77 % de C. La reacción del eutectoide se puede representar como:

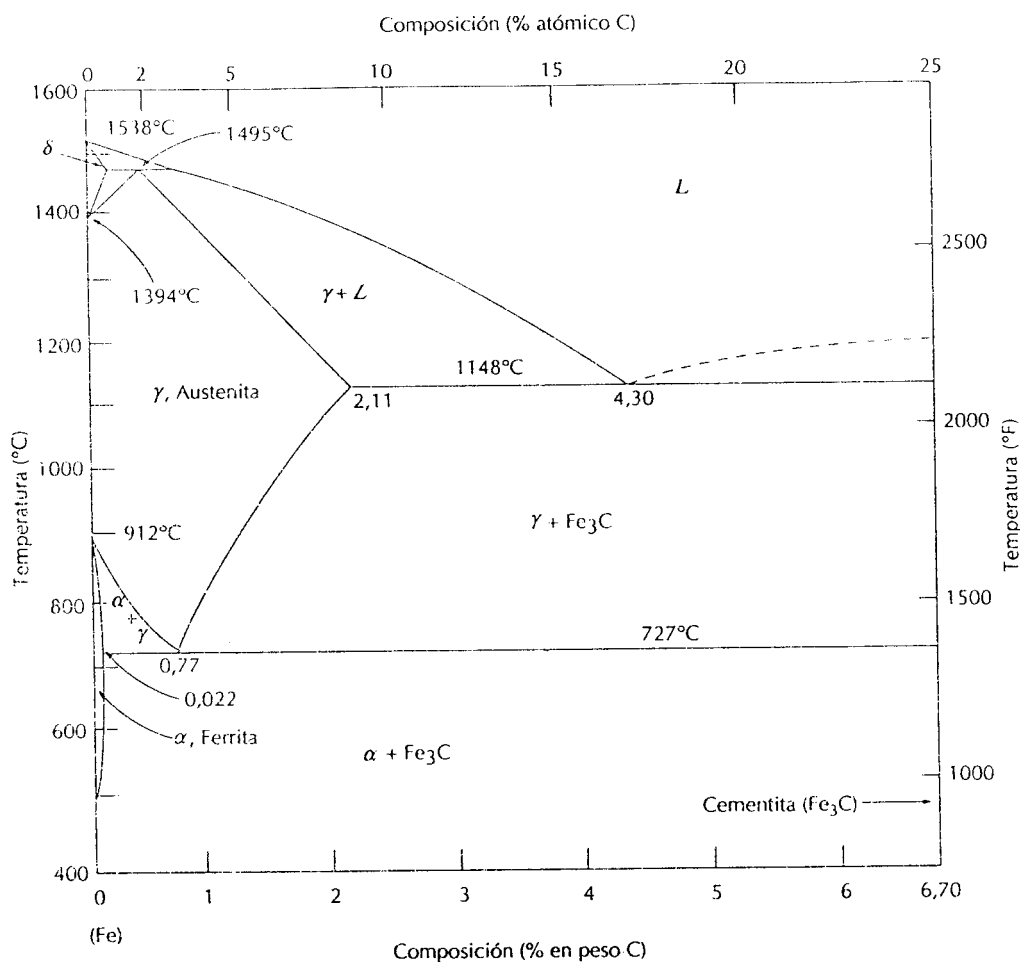
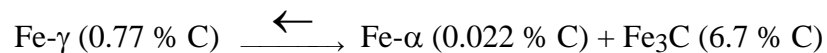


Figura 4.1. Diagrama de fases hierro-cementita

Esta transformación de fase es de una importancia vital en los tratamientos térmicos de los aceros. Como se comentó en la introducción los aceros contienen C entre el 0.008 y el 2.11 % de C, y al enfriarlas desde el campo γ se obtiene una microestructura que está íntimamente relacionada con las propiedades mecánicas de los aceros.

Microestructuras en aleaciones Fe-C. La microestructura que se desarrolla depende tanto del contenido en carbono como del tratamiento térmico. Si el enfriamiento es muy lento se dan condiciones de equilibrio pero si los enfriamientos son muy rápidos se producen procesos que cambian la microestructura y por tanto las propiedades mecánicas.

Se distinguen varios casos. Los aceros eutectoides son aquellos en los que la fase austenítica sólida tiene composición del eutectoide 0.77 % (figura 4.2). Inicialmente la microestructura de la fase γ es muy sencilla con granos orientados al azar (punto a de la línea xx'). Al enfriar se desarrollan las dos fases sólidas Fe- α y cementita. Esta transformación de fases necesita la discusión del carbono ya que las tres fases tienen composiciones diferentes. Para cada grano de austenita se forman dos fases con láminas de ferrita y otras de cementita y relación de fases de 9:1, respectivamente (punto b de la línea xx'). Las orientaciones entre grano son al azar. Esta microestructura de ferrita y cementita (figura 4.2) se conoce como **perlita**, y el nombre deriva de la apariencia de madreperla bajo el microscopio (figura 4.3). Mecánicamente, las perlitas tienen propiedades intermedias entre la blanda y dúctil ferrita y la dura y quebradiza cementita.

Los aceros hipoeutectoides son aquellos en los que la fase austenítica sólida tiene un contenido en carbono inferior a la del eutectoide 0.77 %. Los cambios en la microestructura de un acero de esta composición se dan en la figura 4.4. Para $T \approx 875^\circ\text{C}$, la microestructura de la fase γ es homogénea con granos orientados al azar (punto c de la línea yy'). Al enfriar se desarrolla la fase α y nos encontramos en una región bifásica $\alpha + \gamma$ (punto d de la línea yy'). En este punto se ha segregado un poco de fase α , al bajar en temperatura (punto e de la línea yy') aumenta el contenido en fase α (aunque la proporción depende de la composición inicial del acero hipoeutectoide). La mayor cantidad de fase α se forma en los límites de grano de la fase inicial γ . Al enfriar pasamos a través de la temperatura del eutectoide al punto f de la línea yy'. En esta transformación de fases, la ferrita no cambia prácticamente y la austenita que queda se transforma en perlita dando la microestructura característica de los aceros hipoeutectoides (figura 4.5). La ferrita de la perlita se denomina *ferrita eutectoide* (formada a la temperatura del eutectoide, y proveniente de los granos que restaban de la austenita), la ferrita formada antes del eutectoide (en los límites de grano de la austenita) se denomina *ferrita proeutectoide*. En la perlita la relación de fases es $\approx 9:1$, pero en los aceros hipoeutectoides la relación perlita y ferrita proeutectoide depende del porcentaje inicial de carbono. Esta microestructura siempre se observa en los aceros hipoeutectoides si han sido enfriados lentamente y son los más comunes.

Los aceros hipereutectoides son aquellos en los que la fase austenítica sólida tiene un contenido en carbono entre 0.77 y 2.11 %. Los cambios en la microestructura de un acero de esta composición se dan en la figura 10.6. Para $T \approx 900^\circ\text{C}$, la microestructura de la fase γ es homogénea con granos orientados al azar (punto g de la línea zz'). Al enfriar se desarrolla la cementita y nos encontramos en una región bifásica $\gamma + \text{cementita}$ (punto h de la línea zz'). La cementita se comienza a formar en los límites de grano de la austenita. Esta cementita se denomina *cementita proeutectoide* ya que se ha formado antes de que se de la reacción del eutectoide. Al descender por

debajo de la temperatura eutéctica, toda la austenita remanente de composición eutécticoide se transforma en perlita (punto i de la línea zz'). Por tanto la microestructura es perlita y cementita proeutectoide (figura 4.7).

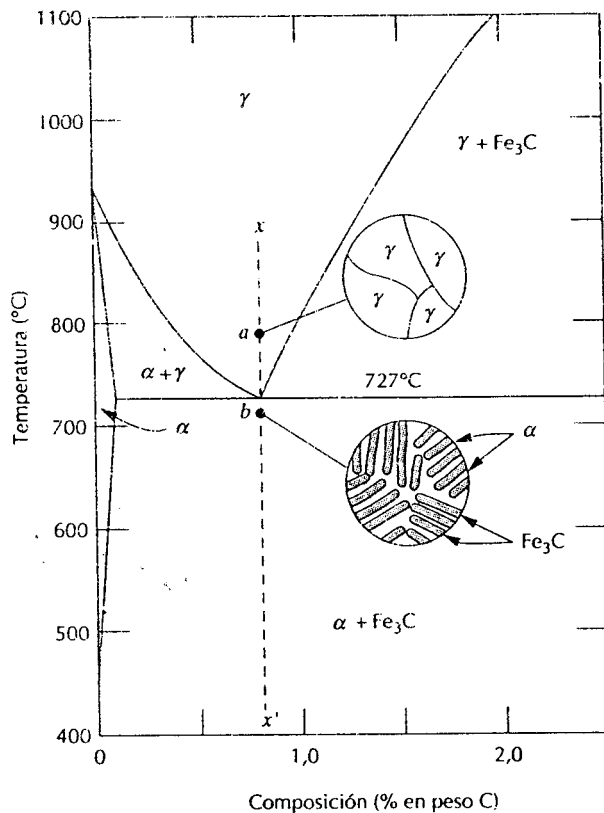


Figura 4.2. Representación esquemática de la microestructura de un acero eutéctico (0.77%)

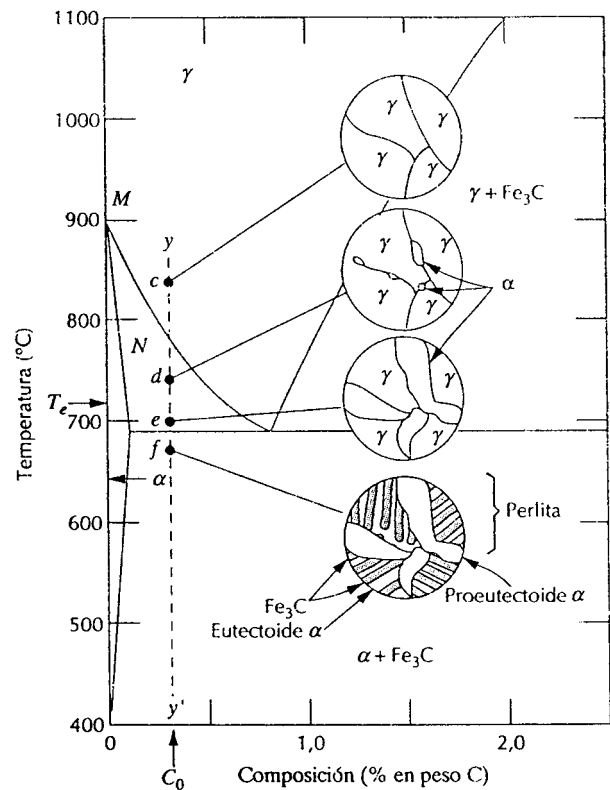


Figura 4.4. Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipoeutéctico

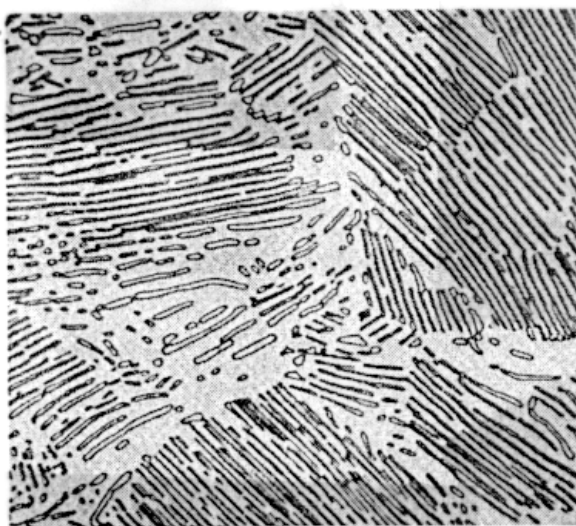


Figura 4.3. Microestructura perlítica de un acero eutéctico mostrando láminas alternas de ferrita-α (fase clara) y cementita (fase oscura)

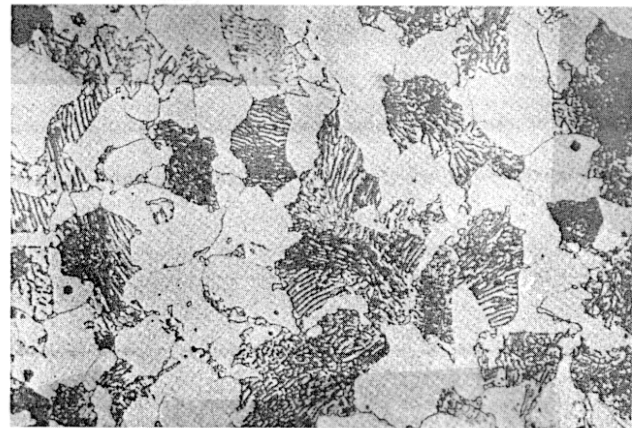


Figura 4.5. Fotomicrografía de un acero con el 0.38 % C, microestructura constituida por perlita y ferrita proeutectoide

En la transformación de la austenita se forma, además de perlita, un constituyente denominado **bainita**. La microestructura bainítica consta de las fases ferrita y cementita, pero

formando agujas o placas según la temperatura de la transformación. La temperatura de la transformación es menor que la de la perlita. Las transformaciones perlítica y bainítica compiten entre sí. La transformación en otro microconstituyente es solo posible si se calienta la aleación.

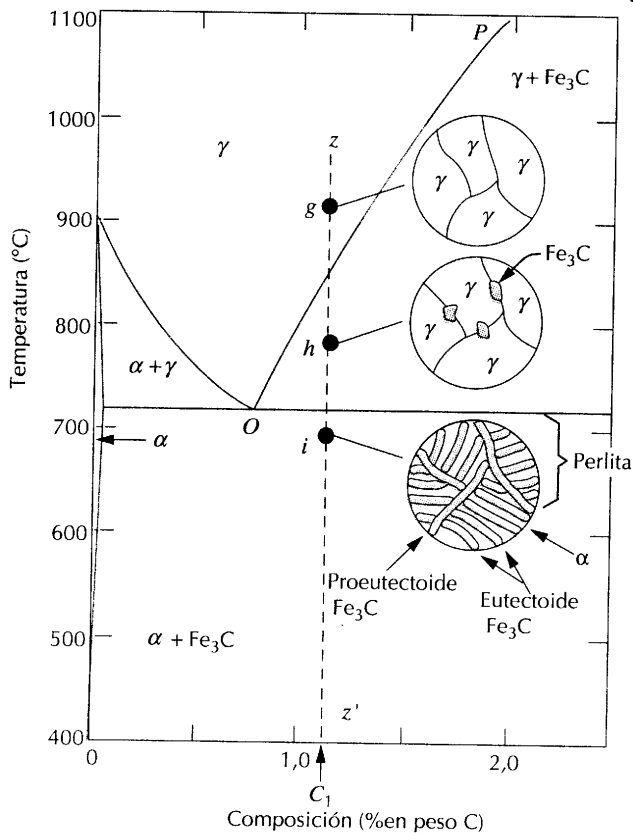


Figura 4.6. Representación esquemática de las microestructuras de un acero hipereutectoide

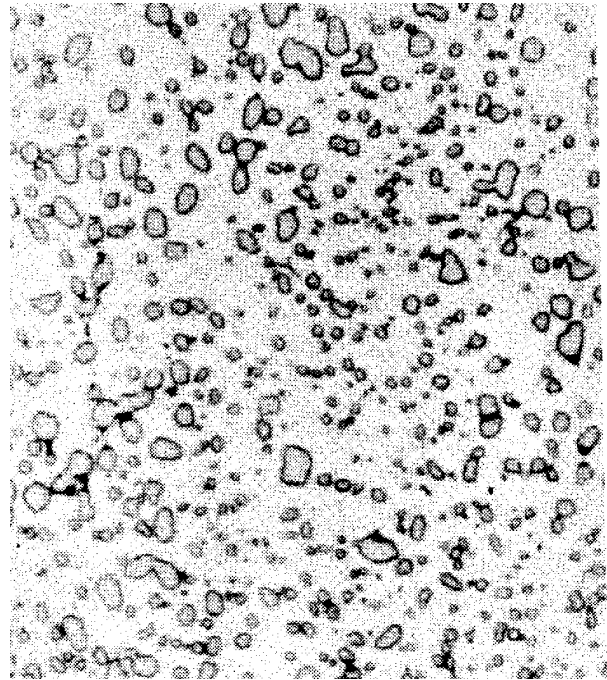


Figura 4.8. Fotomicrografía de un acero con microestructura de esferoidita. Las partículas pequeñas son cementita en una matriz continua de ferrita- α



Figura 4.7. Fotomicrografía de un acero con el 1,4 % C, microestructura constituida por perlita y cementita proeutectoide



Figura 4.9. Fotomicrografía de un acero con microestructura martensítica. Los granos en forma de aguja es la martensita y las regiones blancas es austenita retenida

Si un acero con microestructura perlítica se calienta a una temperatura inferior a la del eutectoide durante un tiempo largo (p. ej., $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 18 - 24\text{ h}$) se forma una nueva

microestructura denominada **esferoidita**, que es cementita globular o esferoidal (figura 4.8). Las partículas de Fe_3C aparecen como pequeñas esferas incrustadas dentro de la matriz ferrítica- α . Esta transformación tiene lugar mediante la difusión del carbono pero sin cambiar las proporciones relativas de la fase ferrita y cementita.

En los casos descritos anteriormente se discuten las fases y microestructuras presentes si el enfriamiento es suficientemente lento y se pueden ajustar las fases a las composiciones de equilibrio. En muchos casos estas transformaciones son tan lentas como impracticables e innecesarias. En estos casos se prefieren las condiciones de no equilibrio. Además, la presencia de otros elementos aleantes modifican mucho la regiones de estabilidad de las diferentes fases en el sistema Fe-C. Por ejemplo, el enfriamiento rápido (temple) hasta una temperatura próxima a la ambiente del acero austenizado origina una microestructura denominada **martensítica** (figura 4.9). Esta resulta como una estructura de no equilibrio de la transformación de la austenita pero sin difusión de carbono, y tiene lugar al enfriar muy rápidamente para evitar la difusión del carbono. Se puede considerar como una transformación competitiva a la de perlita y bainita. Aunque esta transformación no es muy bien conocida se sabe que se transforma desde austenita CCC hasta martensita TCI. Los átomos de carbono permanecen como soluto intersticial dentro de la estructura tetragonal sin que se segregue el carbono en forma de cementita. Este sólido sobresaturado se transforma rápidamente a otras estructuras más estables si se calienta, pero a temperatura ambiente es estable casi indefinidamente.

Al igual que los aceros las fundiciones se pueden clasificar como fundiciones eutécticas, cuando el contenido en carbono es del 4.3 % en peso, fundiciones hipoeutécticas cuando el contenido en carbono es menor y fundiciones hipereutécticas cuando el contenido en carbono es mayor. Según el diagrama de fases, las fundiciones funden a temperaturas entre 1150 y 1300 °C considerablemente más baja que la de los aceros (del orden de 1500 °C). Por tanto funden y se moldean con mayor facilidad y de ahí el nombre que reciben. Sin embargo, las fundiciones se clasifican más por el estado en que se encuentra el carbono. Ya se ha comentado que la cementita es metaestable y desompone para dar ferrita y grafito. En enfriamiento lento y la presencia de algunos elementos (principalmente el silicio con una concentración superior al 1 %) favorecen este proceso y la presencia de otros elementos y los enfriamientos rápidos lo impiden. Las propiedades mecánicas de las fundiciones dependen de la composición y del tratamiento térmico. Los tipos más comunes de fundiciones son: gris, esferoidal, blanca y maleable que se verán posteriormente.

4.2. Aceros y fundiciones. Los aceros son aleaciones hierro-carbono con concentraciones apreciables de otros elementos aleantes. Existen miles de aceros de diferentes composiciones y/o tratamientos térmicos. Los aceros se clasifican según su contenido en carbono en: bajo, medio y alto contenido en carbono. *Los aceros al carbono* solo contienen concentraciones residuales de impurezas mientras que los aceros aleados contienen elementos que se añaden intencionadamente en concentraciones específicas. Los aceros y aleaciones en general se pueden designar de acuerdo a las instrucciones dadas por AISI “American Iron and Steel Institute” ASTM “American Society for

Testing and Materials” y SAE “Society of Automotive Engineers”. La designación AISI/SAE consta de cuatro cifras. Las dos primeras indican el contenido en aleantes y las dos segundas en carbono. Las dos primeras para aceros al carbono son 1 y 0 mientras que en aceros aleados puede ser por ejemplo 13, 41 o 43. Las cifras tercera y cuarta indican el contenido en carbono multiplicado por cien. Por ejemplo, el acero código AISI/SAE 1010 es un acero al carbono (sin elementos aleantes adicionales) y un 0.1 % de C.

Aceros bajos en carbono. Constituye la mayor parte de todo el acero fabricado. Contienen menos del 0.25 % en peso de C, no responde al tratamiento térmico para dar martensita ni se pueden endurecer por acritud. La microestructura consiste en ferrita y perlita. Por tanto, son relativamente blandos y poco resistentes pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad. Son de fácil mecanizado, soldables y baratos. Se utilizan para fabricar vigas, carrocerías de automóviles, y láminas para tuberías edificios y puentes. Otro grupo de aceros de bajo contenido en carbono son los de *alta resistencia y baja aleación*. Contienen concentraciones variables de Cu, V, Ni y Mo totalizando ≈ 10 % en peso. Poseen mucha más resistencia mecánica, que puede aumentar por tratamiento térmico y mantienen las propiedades de fácil mecanizado. Se emplean en componentes donde la resistencia mecánica es crítica: puentes, torres, columnas de soportes de edificios altos, bastidores de camiones y vagones de tren.

Aceros medios en carbono. Contienen entre el 0.25 y 0.60 % en peso de C. Estos aceros pueden ser tratados térmicamente mediante austenización, temple y revenido para mejorar las propiedades mecánicas. La microestructura generalmente es martensita revenida. Las adiciones de Cr, Ni y Mo facilitan el tratamiento térmico que en su ausencia es difícil y útil solo para secciones de pieza relativamente delgadas. Son más resistentes que los aceros bajos en carbono pero menos dúctiles y maleables. Se suelen utilizar para fabricar cinceles, martillos, cigüeñales, pernos, etc.

Aceros altos en carbono. Generalmente contienen entre el 0.60 y 1.4 % en peso de C. Son más duros y resistentes (y menos dúctiles) que los otros aceros al carbono. Casi siempre se utilizan con tratamientos de templado y revenido que lo hacen muy resistentes al desgaste y capaces de adquirir la forma de herramienta de corte. Generalmente contienen Cr, V, W y Mo, los cuales dan carburos muy duros como Cr_{23}C_6 , V_4C_3 y WC. Se utilizan como herramientas de corte, matrices para hechurar materiales, herramientas de herrería y carpintería. Por ejemplo, cuchillos, navajas, hojas de sierra, brocas para cemento, corta tubos, troqueles, herramientas de torno, muelles e hilos e alta resistencia.

La fundición gris tiene un contenido en carbono entre 2.5 y 4.0 % y de silicio entre 1 y 3 %. El grafito suele aparecer como escamas dentro de una matriz de ferrita o perlita, la microestructura se observa en la figura 4.10. El nombre se debe al color de una superficie fracturada. Desde un punto de vista mecánico las fundiciones grises son comparativamente frágiles y poco resistentes a la tracción. La resistencia y la ductilidad a los esfuerzos de compresión son muy superiores. Esta fundiciones amortiguan la energía vibracional de forma mucho más efectiva que los aceros. Así los

equipos que vibran mucho se suelen construir de esta aleación. A la temperatura de colada tienen mucha fluidez por lo que permite moldear piezas de forma muy complicadas. Además, la fundición gris es uno de los materiales metálicos más baratos. Se utiliza en bloque de motores, tambores de freno, cilindros y pistones de motores.

La fundición dúctil o esferoidal se consigue añadiendo pequeñas cantidades de magnesio y cerio a la fundición gris en estado líquido. En este caso, el grafito no se segrega como escamas sino que forma esferoides (figura 4.11) lo que confiere a la fundición propiedades mecánicas diferentes. No es frágil y tiene propiedades mecánicas similares a las de los aceros. Presenta una mayor resistencia a la tracción que la fundición gris. Se suele utilizar para la fabricación de válvulas y engranajes de alta resistencia, cuerpos de bomba, cigüeñales y pistones.

La fundición blanca contienen poco carbono y silicio ($< 1\%$) y se obtienen por enfriamiento rápido. La mayor parte del carbono aparece como cementita en lugar de grafito, y la superficie fracturada tiene una tonalidad blanca. La microestructura se representa en la figura 4.12. La fundición blanca es extremadamente dura frágil por lo que es inmecanizable. Su aplicación se limita a componentes de gran dureza y resistencia al desgaste y sin ductilidad como los cilindros de los trenes de laminación. Generalmente la fundición blanca se obtiene como producto de partida para fabricar la fundición maleable.

La fundición maleable se obtiene a partir de la fundición blanca por calentamiento prolongado en atmósfera inerte (para prevenir la oxidación) a temperaturas entre 800 y 900 °C. En estas condiciones la cementita descompone para dar grafito en forma de racimos o rosetas dentro de la matriz ferrítica o perlítica. La microestructura se representa en la figura 4.13 y es similar a la de la fundición esferoidal. Se suele emplear en tubos de dirección y engranajes de transmisión, muelles tubulares y partes de válvulas.

4.3. Aceros inoxidables. Los aceros inoxidables resisten la corrosión (herrumbre debido al óxido de hierro) en muchos ambientes, especialmente a la atmósfera. El cromo es el elemento más importante de la aleación con un contenido mínimo del 11 %. La resistencia a la corrosión mejora con la adición de Ni y Mo. Los aceros inoxidables se clasifican según la microestructura: martensítica, ferrítica o austenítica. La amplia gama de propiedades mecánicas y la excelente resistencia a la corrosión hace que este tipo de acero sea muy versátil. Algunos aceros inoxidables se utilizan en ambientes rigurosos a elevadas temperaturas debido a su resistencia a la oxidación y a la integridad mecánica en esas condiciones que pueden llegar hasta ~ 1000 °C. Turbinas de gas, generadores de vapor, hornos de tratamientos térmicos, partes de aviones, misiles, etc. son fabricadas con estos tipos de aceros inoxidables.



Figura 4.10. Fotomicrografía de una fundición gris con escamas de grafito embebidas en una matriz de ferrita- α



Figura 4.12. Fotomicrografía de una fundición blanca, las regiones claras son la cementita rodeadas por perlita

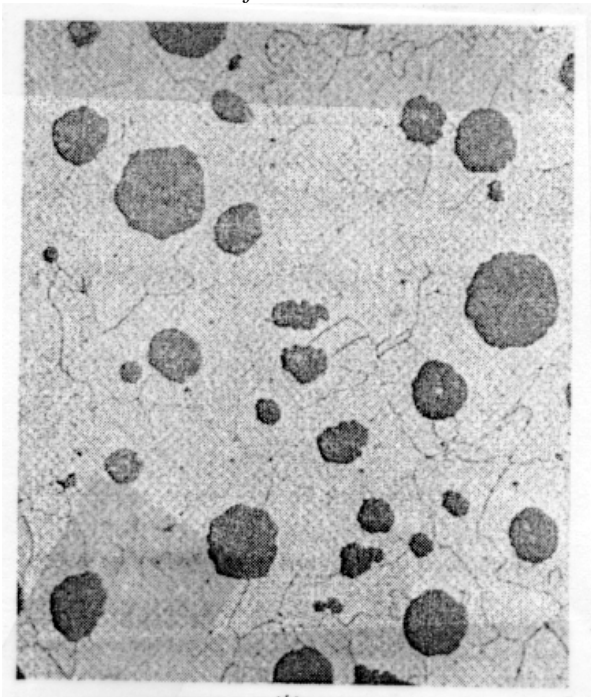


Figura 4.11. Fotomicrografía de una fundición dúctil (esferoidal) con esferoides de grafito embebidas en una matriz de ferrita- α

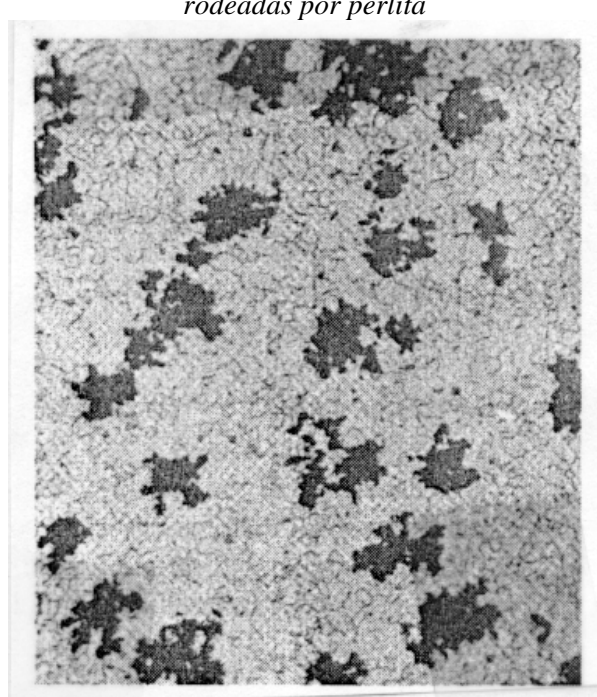


Figura 4.13. Fotomicrografía de una fundición maleable, con el grafito oscuro en forma de rosetas embebidas en una matriz de ferrita- α

Los aceros inoxidables ferríticos se obtienen por recocido y los más comunes son: a) Fe, C 0.08 %, Cr 11 %, Ti 0.75 % y Mn 1% que se utiliza por ejemplo en os tubos de escape y b) Fe, C 0.20 %, Cr 25 % y Mn 1.5 % que se utiliza en válvulas a alta temperatura y moldes para vidrio. Los aceros inoxidables austeníticos también se obtienen por recocido y los más comunes [se tiene la microestructura austenítica por la presencia de grandes cantidades de Ni] son: a) Fe, C 0.08 %, Cr 18 %, Ni 8 y Mn 2% que se emplea en la industria alimentaria y b) Fe, C 0.03 %, Cr 17 %, Ni 12 %, Mn 2% que se emplea en la industria química.

Mo 2.5 y Mn 2 % que se utiliza en estructuras soldadas. Son los más comunes. Los aceros inoxidables martensíticos se obtienen por recocido, templado y revenido, y las dos composiciones más comunes son: a) Fe, C 0.15 %, Cr 12.5 % y Mn 1% que se emplea por ejemplo en cañones de rifles y b) Fe, C 0.70 %, Cr 17 %, Mo 0.75 y Mn 1 % que se utiliza por ejemplo en cuchillería e instrumental quirúrgico.

4.4. Curvas TTT de aceros. Fases y microestructuras. Los tratamientos térmicos más comunes a los que son sometidos los aceros son: temple, recocido y revenido. El temple es un proceso de enfriamiento rápido para dar principalmente martensita, lo que le da mucha dureza pero es metaestable, no se pueden calentar a alta temperatura. El recocido es un tratamiento térmico del acero a alta temperatura para eliminar tensiones, afinar el grano y conseguir más homogeneidad. Por último el revenido es un tratamiento térmico como el recocido pero a menor temperatura para que no haya transformación de fases sino una simple liberación de tensiones y homogeneización. Los diagramas TTT de los aceros dependen de la composición, es decir del contenido en carbono y de los contenidos en otros elementos metálicos. En la figura 4.14 se representa un diagrama TTT de un acero genérico. Se pueden ver las transformaciones de austenita a perlita (gruesa o fina) y a martensita según las velocidades de enfriamiento. Comenzando con un acero austenítico (por encima de 850 °C), y si la velocidad de enfriamiento es lento se cruza las líneas de comienzo y fin de la transformación de la perlita (línea III). Resultado final es un acero perlítico (perlita fina o gruesa en función del tiempo). En el caso de la línea II, comienza la transformación a perlita pero no finaliza (no cruza la línea de final de la transformación), por lo tanto, la fracción de austenita que no ha cambiado se transforma a martensita cuanto intersecciona con la línea Ms. Para la línea I, no hay transformación a perlita y todo cambia a martensita aunque puede quedar algo de austenita metaestable retenida.

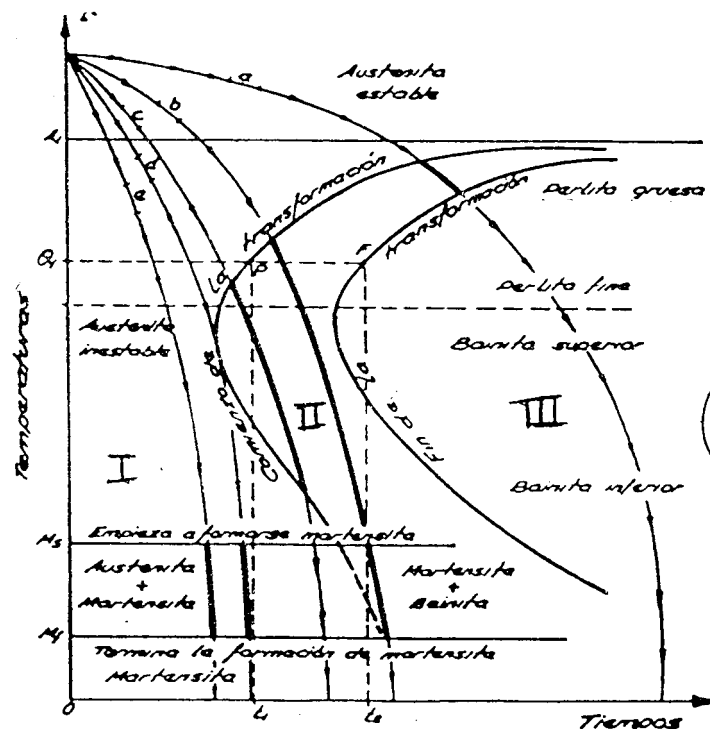


Figura 4.14. Diagrama TTT esquemático de un acero típico